

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**ТОВКАЧ ІГОР ОЛЕГОВИЧ**



УДК 621.396.96

**МЕТОДИ АДАПТИВНОГО ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ  
БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ НА ОСНОВІ  
ВИМІРЮВАНЬ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ**

05.12.17 – Радіотехнічні та телевізійні системи

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

**Київ – 2018**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України на кафедрі радіотехнічних пристроїв та систем.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Жук Сергій Якович**  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», завідувач кафедри радіотехнічних пристроїв та систем

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Конін Валерій Вікторович**  
Національний авіаційний університет, професор кафедри аеронавігаційних систем

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

**Юзефович Володимир Віцентійович**  
Інститут проблем реєстрації інформації Національної академії наук України, старший науковий співробітник науково-технічного відділу систем моніторингу динамічних об'єктів

Захист відбудеться «22» жовтня 2018 р. о 15<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.14 в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056 м. Київ, пр. Перемоги, 37, корп. 1. ауд. 255.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056 м. Київ, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «4» вересня 2018 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 26.002.14  
д.т.н., проф.



Л.О. Уривський

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** В даний час важливим класом джерел радіовипромінювання є безпілотні літальні апарати (БПЛА), які використовуються для вирішення широкого кола завдань. Однак їх доступність і масове використання привело до появи нового класу загроз: застосування в терористичних цілях, фотозйомка засекречених об'єктів, отримання несанкціонованого доступу до інформації в мережах WLAN, вторгнення на заборонену територію та ін. Це обумовлює необхідність розробки систем, які вирішують завдання виявлення, визначення місця розташування та параметрів руху БПЛА.

Розвиток технологій бездротового зв'язку і мікроелектроніки призвів до появи і широкого використання бездротових сенсорних мереж (БСМ), що представляють собою розподілені мережі, що самоорганізуються з мініатюрних датчиків, які обмінюються інформацією за допомогою бездротової технології. Одним з основних застосувань БСМ є створення різних систем моніторингу та відстеження рухомих джерел радіовипромінювання, в тому числі і БПЛА. Найбільшого поширення для визначення місцеположення невідомого БПЛА за допомогою БСМ знаходять методи на основі вимірювання різниці часу приходу сигналів (TDOA-вимірювання) і потужності сигналу (RSS-вимірювання). Однак в отриманих з використанням критеріїв максимальної правдоподібності і найменших квадратів методах позиціонування БПЛА на основі TDOA- і RSS-вимірювань, обчислення координат БПЛА виконується після надходження вимірювань від всіх датчиків, що призводить до необхідності обертати матриці великих розмірностей, а також не враховується дисперсія помилок вимірювання потужності.

Сучасні БПЛА можуть виконувати рух з різними видами маневрів, що призводить до зниження точності визначення їх місцеположення і параметрів руху, а також ускладнює вирішення завдань протидії БПЛА і їх нейтралізації. Синтезовані на основі методу калманівської фільтрації в дискретному часі алгоритми визначення параметрів руху цілі за даними траєкторних вимірювань є рекурентними і зручними для реалізації на ЕОМ. Однак при оцінюванні параметрів руху маневруючих об'єктів такі алгоритми часто є розбіжними.

Байєсівський метод адаптивного оцінювання процесів з випадковою структурою в дискретному часі призводить до фільтрів зі зростаючим числом каналів, які практично не можуть бути реалізовані і не дозволяють отримати рекурентні оптимальні алгоритми оцінювання таких процесів.

Тому актуальною **науковою задачею** є розробка методів адаптивного оцінювання параметрів руху БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі і при їх комплексному використанні для підвищення точності визначення його місцеположення.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана на кафедрі «Радіотехнічних пристроїв і систем» радіотехнічного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського в рамках науково-дослідних робіт

«Розробка алгоритмів адаптивного супроводження безпілотних літальних апаратів за даними сенсорної мережі з використанням методів пасивної локації» (номер державної реєстрації 0116U007862) та «Розробка алгоритмів супроводження цілі за даними трикоординатної РЛС з виявленням маневру» (номер державної реєстрації 0116U006094).

**Мета роботи** – підвищення точності визначення місцеположення БПЛА шляхом розробки методів адаптивного оцінювання його параметрів руху на основі TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі і при їх комплексному використанні.

Відповідно до мети, основними завданнями дослідження є:

1. Проаналізувати методи визначення місцеположення і параметрів руху БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі.
2. Удосконалити методи визначення місцеположення БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі і при їх комплексному використанні.
3. Розробити методи адаптивного оцінювання параметрів руху БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі і при їх комплексному використанні, в яких виконується розпізнавання різних видів його руху.
4. Проаналізувати ефективність синтезованих алгоритмів визначення місцеположення і параметрів руху БПЛА шляхом статистичного моделювання на ЕОМ і порівняння їх з відомими.
5. Виконати аналіз обчислювальних затрат і можливостей практичної реалізації синтезованих алгоритмів з використанням сучасної мікропроцесорної техніки.

**Об'єктом дослідження** є процеси визначення місцеположення БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі.

**Предметом дослідження** є методи оцінювання параметрів руху БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі.

**Методи дослідження.** В роботі використовувалися методи теорії ймовірностей, марківських випадкових процесів, лінійної і нелінійної фільтрації в дискретному часі, статистичної теорії прийняття рішень і статистичного моделювання на ЕОМ.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

Вперше розроблено метод адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі TDOA-вимірювань сенсорної мережі, в якому, на відміну від існуючих, виконується розпізнавання виду його маневру і оцінювання помилки вимірювання опорного датчика, що дозволяє реалізувати послідовну обробку вимірювань, які надходять, і уникнути обернення матриць великих розмірностей.

Вперше розроблено метод адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі RSS-вимірювань сенсорної мережі, в якому, на відміну від існуючих, оцінюється невідома потужність передавача, виконується розпізнавання виду його маневру і враховується дисперсія

помилки вимірювання потужності датчиками мережі, що дозволяє його використовувати для визначення місцеположення БПЛА невідомого типу.

Вперше розроблено метод адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА, в якому, на відміну від існуючих, виконується комплексна обробка TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі при невідомій потужності передавача, що дозволяє підвищити точність визначення його місця розташування в порівнянні з їх роздільною обробкою.

#### **Практичне значення отриманих результатів.**

Розроблені адаптивні фільтри на основі TDOA- і RSS- вимірювань дозволяють зменшити СКВ помилки визначення місцеположення БПЛА в горизонтальній площині в порівнянні з рекурентними алгоритмами визначення місцеположення в 2–4 рази, а застосування комплексної обробки TDOA- і RSS-вимірювань сенсорної мережі, дозволяє зменшити СКВ цієї помилки додатково в 2–5 рази.

Адаптивні фільтри на основі TDOA- і RSS- вимірювань дозволяють розпізнати зависання і майже рівномірний рух БПЛА з ймовірністю близькою до одиниці. Адаптивний фільтр на основі комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань дозволяє підвищити ймовірність розпізнавання короточасних маневрів БПЛА в 2–3 рази.

Конфігурація з дев'яти датчиків, вісім з яких розташовані рівномірно на колі, забезпечує вид ізоліній кругового СКВ місцеположення в горизонтальній площині також у вигляді кіл і може бути рекомендована, якщо напрямок появи БПЛА невідомий.

Розроблені рекурентні алгоритми визначення місцеположення БПЛА на основі TDOA-, RSS-, а також комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі забезпечують точнісні характеристики близькі до потенційно досяжних, що визначаються нижньою границею Рао-Крамера.

Розроблені алгоритми адаптивної фільтрації параметрів руху маневруючого БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі, а також при їх комплексному використанні не вимагають значних обчислювальних затрат і можуть бути реалізовані на сучасному процесорі DSP TMS320C6747 в реальному масштабі часу.

Результати досліджень впроваджено в розробках державного підприємства науково-дослідного інституту радіолокаційних систем “Квант-Радіолокація”.

**Особистий внесок.** Основні теоретичні положення і результати моделювання в дисертаційній роботі отримані автором самостійно. У співавторстві з науковим керівником сформульовані мета і завдання досліджень, висновки. Особистий внесок автора в наукових працях, опублікованих у співавторстві, такий: в [1], [3] розроблені рекурентні алгоритми визначення місця розташування джерел радіовипромінювання на основі RSS- і TDOA- вимірювань; в [2], [5] синтезовані оптимальні і квазіоптимальні адаптивні алгоритми оцінювання параметрів руху БПЛА на основі RSS-вимірювань, а також при комплексному використанні TDOA- і RSS- вимірювань; в [4] розроблено рекурентний алгоритм оцінювання

параметрів руху БПЛА при комплексному використанні TDOA- і RSS-вимірювань.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертації та основні положення, отримані в роботі, представлялися на: міжнародних науково-технічних конференціях «Радіотехнічні поля, сигнали та системи» (м. Київ, 2016, 2017, 2018); X, XI, XII Міжнародних Науково-технічних Конференціях «Проблеми телекомунікацій» (м. Київ, 2016, 2017, 2018); X науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Радіoeлектроніка в XXI столітті» (м. Київ, 2016); IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON) (Kyiv, Ukraine, 2017); The International Emergency Management Society, Special Edition (Belgium, 2017); TCSET-2018: 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (Lviv-Slavske, Ukraine, 2018).

**Публікації.** За результатами дисертаційної роботи опубліковано 16 наукових робіт, в тому числі 5 статей в провідних фахових виданнях, з яких 2 у виданнях України включених до міжнародної наукометричної бази WEB OF SCIENCE та 2 в іноземних виданнях, які включені до міжнародної наукометричної бази SCOPUS, 11 тез доповідей.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, одного додатку. Робота містить 169 сторінки, в тому числі 163 сторінок основного тексту, 92 рисунка, 3 таблиці. Список використаної літератури включає 87 найменувань. Додаток розміщено на 6 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовані мета і завдання дослідження, об'єкт, предмет і методи дослідження, вказано наукову новизну результатів та їх практичну значимість, наведені дані про особистий внесок здобувача, впровадження результатів, їх апробацію та публікації.

У **першому розділі** показана актуальність завдання визначення параметрів руху БПЛА на основі даних сенсорної мережі. Проведено аналіз існуючих методів визначення місцеположення цілі на основі TDOA- і RSS-вимірювань за допомогою сенсорної мережі.

Рівняння TDOA-вимірювань для сенсорної мережі має вид

$$\Delta^s = r^s - r^0 + v^s - v^0 = r^s - r^0 + v^{s0}, \quad s = \overline{1, S}, \quad (1)$$

де  $\Delta^s$  – виміряна різниця відстаней між  $s$ -м і опорним датчиками  $s = \overline{1, S}$ ;  $r^s$  – відстань між  $s$ -м датчиком і БПЛА  $s = \overline{0, S}$ ;  $v^{s0} = v^s - v^0$  – помилка вимірювань різниці відстаней.

Рівняння RSS-вимірювань на основі моделі прямого поширення, що враховує тільки загасання сигналу, має вид:

$$p^s = p_0 - 10 \cdot a \cdot \lg \left( \frac{r^s}{r_0} \right) + v^s \quad (2)$$

де  $p^s$  – виміряна  $s$ -м датчиком потужність сигналу БПЛА,  $s = \overline{1, S}$ ;  $p_0$  – потужність сигналу на заданій відстані  $r_0$ ;  $a$  – коефіцієнт загасання сигналу;  $v^s$  – помилка вимірювання потужності прийнятого сигналу.

Проведено аналіз методу калманівської фільтрації параметрів руху рухомих об'єктів, а також адаптивних алгоритмів оцінювання параметрів руху маневруючої цілі. Показана доцільність застосування для вирішення задачі оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі математичного апарату ЗМП в дискретному часі. Сформульована мета роботи та завдання дослідження.

У **другому розділі** з використанням математичного апарату розширеної калманівської фільтрації розроблені рекурентні алгоритми визначення місцеположення БПЛА за даними сенсорної мережі на основі: TDOA-вимірювань; RSS-вимірювань; комплексної обробки TDOA- і RSS-вимірювань.

При TDOA-вимірюваннях помилка вимірювання опорного датчика  $v^0$  в виразі (1) і вона включається в вектор стану оцінюваних параметрів. При цьому рівняння, що описує динаміку зміни оцінюваних параметрів, має вид

$$u^l = u^{l-1}, \quad (3)$$

де  $u^l = (x^l, y^l, z^l, v^{0l})^T$  – вектор стану. Індекс  $l$  характеризує послідовність надходжень вимірних різниць відстаней від відповідних датчиків мережі.

Рівняння вимірювання, з урахуванням (1), (3) можна представити у виді

$$\Delta^l = h^l(u^l) + v^l, \quad (4)$$

де  $h^l(u^l)$  – нелінійна функція, яка при оцінювання координат на площині, описується виразом

$$h^l(u^l) = \sqrt{(x^l - x_s)^2 + (y^l - y_s)^2 + (z^l - z_s)^2} - \sqrt{(x^l)^2 + (y^l)^2 + (z^l)^2} - v^{0l}; \quad (5)$$

$v^l$  – помилка вимірювання датчика з координатами  $x_s, y_s, z_s$ .

Рекурентний алгоритм оцінювання вектора стану  $u^l$  отриманий на основі розширеного фільтра Калмана і описується рівняннями

$$K^l = \hat{P}^{l-1} \cdot \frac{\partial h^{lT}(\hat{u}^{l-1})}{\partial u^l} \left[ \frac{\partial h^l(\hat{u}^{l-1})}{\partial u^l} \hat{P}^{l-1} \frac{\partial h^{lT}(\hat{u}^{l-1})}{\partial u^l} + \sigma_{\Delta}^2 \right]^{-1}; \quad (6)$$

$$\hat{u}^l = \hat{u}^{l-1} + K^l [\Delta^l - h^l(\hat{u}^{l-1})]; \quad (7)$$

$$\hat{P}^l = \hat{P}^{l-1} - K^l \frac{\partial h^l(\hat{u}^{l-1})}{\partial u^l} \hat{P}^{l-1}. \quad (8)$$

При RSS-вимірюваннях, рівняння, що описує динаміку зміни оцінюваних параметрів, описується рівнянням (3), в якому вектор стану має вид  $u^l = (x^l, y^l, z^l)^T$ . Рівняння спостереження має вид

$$p^l = h^l(u^l) + v^l, \quad (9)$$

де  $h^l(u^l)$  – нелінійна функція, яка описується виразом

$$h^l(u^l) = p_0 - 10 \cdot a \cdot \lg \left( \frac{\sqrt{(x^l - x_s)^2 + (y^l - y_s)^2 + (z^l - z_s)^2}}{r_0} \right). \quad (10)$$

Рекурентний алгоритм оцінювання вектора стану  $u^l$  отриманий на основі розширеного фільтра Калмана і описується рівняннями

$$K^l = \hat{P}^{l-1} \cdot \frac{\partial h^{lT}(\hat{u}^{l-1})}{\partial u^l} \left[ \frac{\partial h^l(\hat{u}^{l-1})}{\partial u^l} \hat{P}^{l-1} \frac{\partial h^{lT}(\hat{u}^{l-1})}{\partial u^l} + \sigma_p^2 \right]^{-1}; \quad (11)$$

$$\hat{u}^l = \hat{u}^{l-1} + K^{l-1} [p^l - h^l(\hat{u}^{l-1})]; \quad (12)$$

$$\hat{P}^l = \hat{P}^{l-1} - K^l \frac{\partial h^l(\hat{u}^{l-1})}{\partial u^l} \hat{P}^{l-1}. \quad (13)$$

Підвищення точності визначення місцеположення БПЛА може бути досягнуто шляхом комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі. Рівняння, що описує динаміку зміни оцінюваних параметрів, має вид (3). Рекурентний алгоритм оцінювання вектора стану  $u^l$  може бути отриманий на основі розширеного фільтра Калмана і описується рівняннями, аналогічними (6)...(8) і (11)...(13).

Аналіз синтезованих алгоритмів і порівняння з відомими алгоритмами виконані на площині за допомогою статистичного моделювання. Конфігурація сенсорної мережі складається з дев'яти датчиків (рис. 1, а). На рис.1, б сенсорна мережа складається з мінімального числа датчиків для формування початкових умов адаптивного оцінювання. СКВ помилок TDOA- і RSS- вимірювань  $\sigma_\Delta = 1$  м і  $\sigma_p = 0.5$  дБ, відповідно.

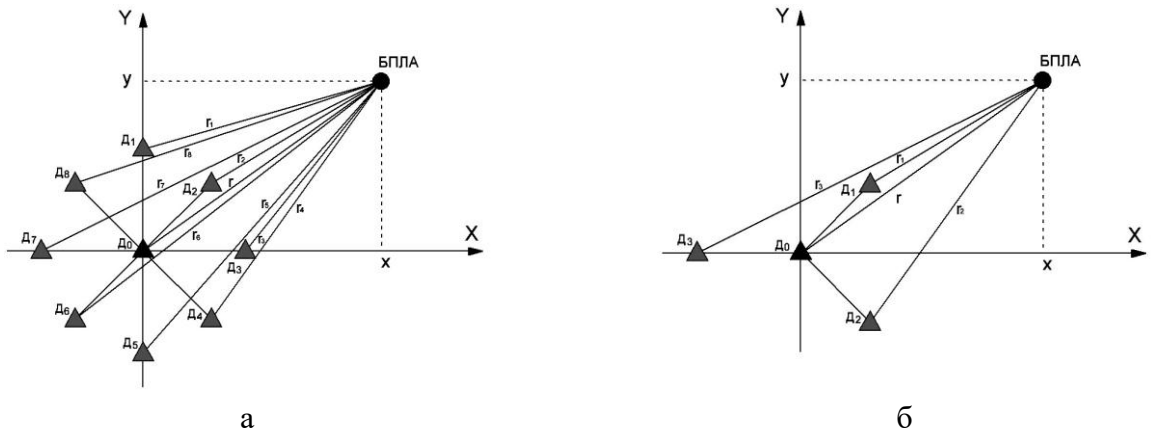


Рис. 1. Конфігурація сенсорної мережі з: а - 9 датчиків; б - 4 датчиків.



На рис. 2 показані: кругове СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА, яке відповідає нижній границі Рао-Крамера (крива 1); залежність фактичного  $\hat{\sigma}_{KK}^{MK}$  (крива 2,4) і теоретичного  $\hat{\sigma}_{KK}$  (крива 3,5) кругового СКВ помилки оцінки місцезнаходження БПЛА для розроблених алгоритмів на основі TDOA- і RSS- вимірювань, відповідно; залежність фактичного  $\hat{\sigma}_{\Phi K}^{MK}$  (крива 6) і теоретичного  $\hat{\sigma}_{\Phi K}$  (крива 7) кругового СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА для рекурентного алгоритму на основі комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань. Значення кругового СКВ помилки визначення місцеположення БПЛА розробленим алгоритмом при комплексному використанні TDOA- і RSS- вимірювань, менше ніж СКВ помилки визначення місцеположення БПЛА при їх роздільному використанні, в 3 рази і отримані характеристики близькі до потенційно досяжних, визначених нижньою границею Рао-Крамера.

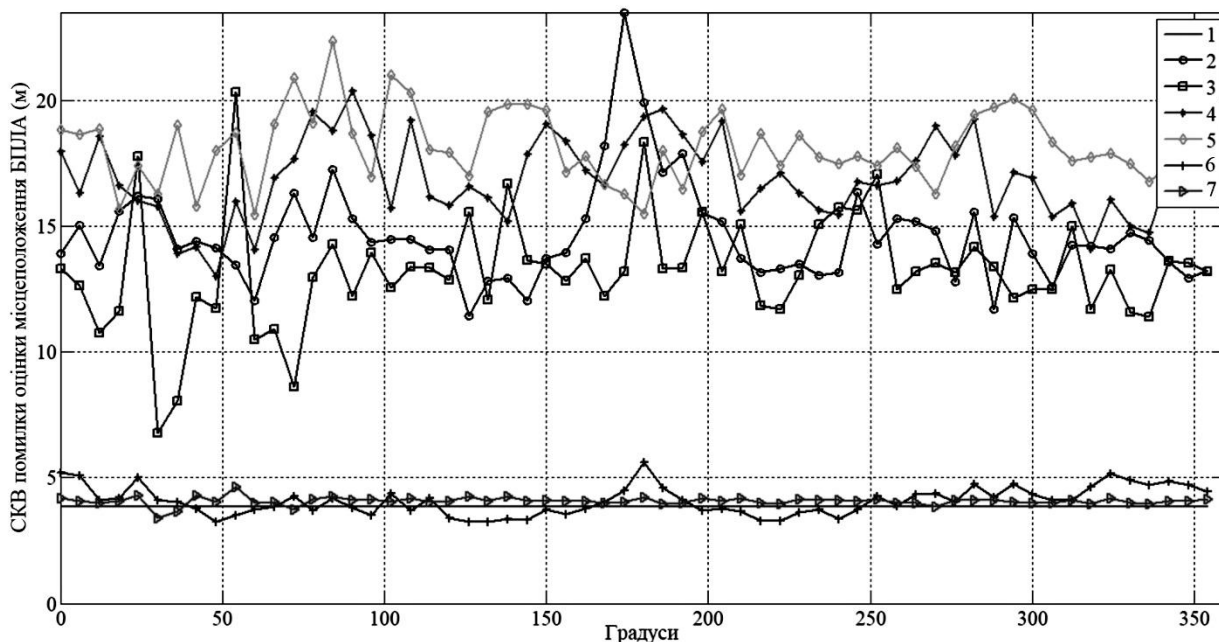


Рис. 2 Кругове СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА

Застосування розробленого рекурентного алгоритму на основі TDOA-вимірювань (6)...(8) дозволяє в порівнянні з початковими умовами зменшити кругове СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА в 1.5–4.2 рази. Застосування розробленого рекурентного алгоритму RSS-вимірювань (11)...(13) дозволяє в порівнянні з алгоритмами, в яких не враховується дисперсія помилок вимірювання потужності, зменшити кругове СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА на 36–44%.

Виконано аналіз ізоліній СКВ помилки вимірювання дальності  $\sigma_r$ , джерела радіовипромінювання, отриманих на основі нижньої границі Рао-Крамера при використанні TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі, побудованих в координатах  $x, y$ .

З розглянутих конфігурацій рівномірну область покриття забезпечує сенсорна мережа з дев'яти датчиків, які розташовані на колі. При збільшенні числа датчиків понад дев'яти, істотного приросту в точності визначення

місцеположення БПЛА не відбувається. Тому, розглянута топологія мережі з дев'яти датчиків, може бути рекомендована для використання на практиці, якщо напрямок появи цілі невідомо. Розглянута конфігурація сенсорної мережі з п'яти датчиків, дозволяє в заданих напрямках отримати більш високі точнісні характеристики при меншій кількості датчиків в порівнянні з конфігурацією мережі з дев'яти датчиків і може бути рекомендована для визначення місцеположення цілі в заданому секторі.

У **третьому розділі** на основі математичного апарату змішаних марківських процесів в дискретному часі синтезовано оптимальні та квазіоптимальні алгоритми адаптивної фільтрації параметрів руху маневруючого БПЛА за даними сенсорної мережі на основі: TDOA-вимірювань; RSS-вимірювань; комплексної обробки TDOA- і RSS-вимірювань. Модель процесу, що підлягає фільтрації на основі TDOA-вимірювань, перетвориться до виду

$$u(k) = F_j u(k-1) + G_j \omega(k), \quad j = \overline{1, M}, \quad (14)$$

в якому матриці  $F_j$  і  $G_j$  мають вид

$$F_j = \begin{bmatrix} F_j^{tr} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad G_{\Delta j} = \begin{bmatrix} G_j^{tr} & 0 \\ 0 & \sigma_{\Delta} \end{bmatrix}.$$

Рівняння спостереження має вид

$$\Delta^s(k) = h^s(u(k)) + v^s(k), \quad s = \overline{1, S}, \quad (15)$$

де  $\Delta^s(k)$  – виміряна різниця дальностей між  $s$ -м датчиком і опорним датчиком в  $k$ -й момент часу,  $s = \overline{1, S}$ .

Завдання синтезу оптимального алгоритму зводиться до обчислення апостеріорної щільності ймовірності розширеного процесу  $W(u(k), a_j(k)) = P(u(k), a_j(k) / \Xi_{\Delta}(k))$ , де  $\Xi(k) = \xi(1), \dots, \xi(k)$  – отримана послідовність вимірювань до  $k$ -го кроку включно;  $\xi(k) = (\Delta^1(k), \dots, \Delta^S(k))$  – вимірювання на  $k$ -му кроці. Вона обчислюється за допомогою рекурентного алгоритму

$$W_j^*(k) = \sum_{i=1}^M \Pi_{ij}(k, k-1) W_i(k-1); \quad (16)$$

$$W_j^*(u(k)) = \sum_{i=1}^M \Pi_{ij}(k, k-1) W_i(k-1) \times \quad (17)$$

$$\times \int_{-\infty}^{\infty} \Pi(u(k) / u(k-1), a_j(k)) W_i(u(k-1)) du(k-1) / W_j^*(k);$$

$$W_j(u(k)) = P(\xi(k) / u(k)) W_j^*(u(k)) / P(\xi(k) / a_j(k), \Xi(k-1)); \quad (18)$$

$$W_j(k) = P(\xi(k) / a_j(k), \Xi(k-1)) W_j^*(k) / P(\xi(k) / \Xi(k-1)), \quad (19)$$

де  $W_j^*(u(k))$ ,  $W_j(u(k))$  – умовні екстрапольована і апостеріорна щільності ймовірності вектора  $u(k)$  за умови  $a_j(k)$ ;  $W_j^*(k)$ ,  $W_j(k)$  – екстрапольовані і

апостеріорні ймовірності  $a_j(k)$ ;  $P(\xi(k)/a_j(k), \Xi(k-1))$  – умовна щільність ймовірності.

Оптимальний пристрій, що реалізує алгоритм (16)...(19), є багатоканальним з числом каналів  $M$ . Оптимальний пристрій відноситься до класу пристроїв із зворотними зв'язками між каналами. Недоліком оптимального алгоритму є великі обчислювальні витрати, пов'язані з необхідністю інтегрування багатовимірних щільностей ймовірності.

Отримано квазіоптимальний алгоритм в якому виконується послідовна обробка даних, що надходять. При цьому рівняння обчислення умовної екстрапольованої щільності ймовірності  $W_j^*(u(k))$  (17) зводиться до обчислення її першого  $u_j^*(k)$  і другого  $P_j^*(k)$  моментів за формулами

$$u_j^*(k) = \sum_{i=1}^M \Pi_{ij}(k, k-1) W_i(k-1) F \hat{u}_i(k-1) / W_j^*(k); \quad (20)$$

$$P_j^*(k) = \sum_{i=1}^M \Pi_{ij}(k, k-1) W_i(k-1) \{ F_j \hat{P}_i(k-1) F_j^T + G_j G_j^T \} / W_j^*(k); \quad (21)$$

Рівняння обчислення умовної апостеріорної щільності ймовірності  $W_j(u(k))$  (18) при послідовній обробці вимірювань, що надходять  $\Delta^l(k), l = \overline{1, S}$  також зводиться до обчислення її першого  $\hat{u}_j^l(k)$  і другого  $\hat{P}_j^l(k)$  моментів з використанням рекурентної процедури

$$K_j^l(k) = \hat{P}_j^{l-1}(k) \frac{\partial h^{lT}(\hat{u}_j^{l-1}(k))}{\partial u^l(k)} (D_j^l(k))^{-1}, \quad (22)$$

$$\hat{u}_j^l(k) = \hat{u}_j^{l-1}(k) + K_j^l(k) (\Delta^l(k) - h^l(\hat{u}_j^{l-1}(k))), \quad (23)$$

$$\hat{P}_j^l(k) = \hat{P}_j^{l-1}(k) - K_j^l(k) \frac{\partial h^l(\hat{u}_j^{l-1}(k))}{\partial u^l(k)} \hat{P}_j^{l-1}(k), \quad (24)$$

де  $\hat{u}_j^l(k)$ ,  $\hat{P}_j^l(k)$  – математичне очікування і кореляційна матриця умовної апостеріорної щільності ймовірності  $W_j(u(k))$ , уточнена за вимірюваннями  $\Delta^l(k), l = \overline{1, S}$ . Початкові умови для процедури (20) ... (24) при  $l=0$  мають вид  $\hat{u}_j^0(k) = u_j^*(k)$ ,  $\hat{P}_j^0(k) = P_j^*(k)$ ,  $j = \overline{1, M}$ , а  $\hat{u}_j^S(k) = \hat{u}_j^S(k)$ ,  $\hat{P}_j^S(k) = \hat{P}_j^S(k)$ ,  $j = \overline{1, M}$ . Перевагою методу є відсутність необхідності обернення матриць великих розмірностей, оскільки  $D_j^l(k)$  є скалярною величиною. Розроблений алгоритм забезпечує полігаусівську апроксимацію апостеріорної щільності ймовірності  $W(u(k))$ .

На основі моделі руху БПЛА і рівняння RSS-вимірювань сенсорної мережі (2) синтезований алгоритм фільтрації параметрів руху БПЛА, в якому також рекурентно оцінюється невідома потужність його передавача.

Вектор стану процесу, що підлягає фільтрації в розглянутій задачі має вид  $u^T(k) = (u^{trT}(k), p_0(k))$ . Модель динамічної системи має вид (14), де матриці  $F_j$  і  $G_j$  перетворюються до виду

$$F_j = \begin{bmatrix} F_j^{tr} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad G_j = \begin{bmatrix} G_j^{tr} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Рівняння спостереження (2) має вид

$$p^s(k) = h^s(u(k)) + v^s(k), \quad s = \overline{1, S}, \quad (25)$$

де  $p^s(k)$  – виміряна  $s$ -м датчиком потужність сигналу БПЛА в  $k$ -й момент часу,  $s = \overline{1, S}$ .

Оптимальний алгоритм фільтрації процесу  $(u(k), a_j(k))$  описується виразами, аналогічними (16)...(19). А квазіоптимальний алгоритм має схожість з квазіоптимальним алгоритмом (20)...(24). При цьому обчислення першого  $\hat{u}_j(k)$  і другого  $\hat{p}_j(k)$  моментів умовної апостеріорної щільності ймовірності  $W_j(u(k))$  при послідовній обробці вимірювань, що надходять  $p^s(k), s = \overline{1, S}$  виконується за формулами

$$K_j^s(k) = \hat{P}_j^{s-1}(k) \frac{\partial h^{sT}(\hat{u}_j^{s-1}(k))}{\partial u^s(k)} (D_j^s(k))^{-1}, \quad (26)$$

$$\hat{u}_j^s(k) = \hat{u}_j^{s-1}(k) + K_j^s(k)(p^s(k) - h^s(\hat{u}_j^{s-1}(k))), \quad (27)$$

$$\hat{P}_j^s(k) = \hat{P}_j^{s-1}(k) - K_j^s(k) \frac{\partial h^s(\hat{u}_j^{s-1}(k))}{\partial u^s(k)} \hat{P}_j^{s-1}(k). \quad (28)$$

Квазіоптимальний алгоритм адаптивного оцінювання з послідовним способом обробки RSS-вимірювань з відомою потужністю передавача, є окремих випадком адаптивного алгоритму оцінювання з невідомою потужністю.

Підвищення точності оцінювання параметрів руху БПЛА може бути досягнуто шляхом комплексної обробки даних. Об'єднаний вектор вимірів має вид  $\xi^{sT}(k) = (\Delta^s(k), p^s(k))$ . При цьому модель процесу, що підлягає фільтрації, описується виразом (14), в якому матриці  $F_j$  і  $G_j$  перетворюються до виду

$$F_j = \begin{bmatrix} F_j^{tr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad G_j = \begin{bmatrix} G_j^{tr} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma^0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Оптимальний алгоритм фільтрації процесу  $(u(k), a_j(k))$  також описується виразами, аналогічними (16)...(19).

Квазіоптимальний алгоритм адаптивного оцінювання з послідовним способом обробки TDOA- і RSS- вимірювань при невідомій потужності

передавача має схожість з квазіоптимальним алгоритмом (20)...(24). При цьому обчислення першого  $\hat{u}_j(k)$  і другого  $\hat{P}_j(k)$  моментів умовної апостеріорної щільності ймовірності  $W_j(u(k))$  при послідовній обробці вимірювань, що надходять  $\Delta^l(k), p^l(k), l = \overline{1, S}$  виконується за формулами

$$K_{\Delta j}^l(k) = \hat{P}_{pj}^{l-1}(k) \frac{\partial h_{\Delta}^{IT}(\hat{u}_{pj}^{l-1}(k))}{\partial u^l(k)} \left( D_{\Delta j}^l(k) \right)^{-1}; \quad (29)$$

$$\hat{u}_{\Delta j}^l(k) = \hat{u}_{pj}^{l-1}(k) + K_{\Delta j}^l(k) (\Delta^l(k) - h_{\Delta}^l(\hat{u}_{pj}^{l-1}(k))); \quad (30)$$

$$\hat{P}_{\Delta j}^l(k) = \hat{P}_{pj}^{l-1}(k) - K_{\Delta j}^l(k) \frac{\partial h_{\Delta}^l(\hat{u}_{pj}^{l-1}(k))}{\partial u^l(k)} \hat{P}_{pj}^{l-1}(k); \quad (31)$$

$$K_{pj}^l(k) = \hat{P}_{\Delta j}^l(k) \frac{\partial h_p^{IT}(\hat{u}_{\Delta j}^l(k))}{\partial u^l(k)} \left( D_{pj}^l(k) \right)^{-1}; \quad (32)$$

$$\hat{u}_{pj}^l(k) = \hat{u}_{\Delta j}^l(k) + K_{pj}^l(k) (p^l(k) - h_p^l(\hat{u}_{\Delta j}^l(k))); \quad (33)$$

$$\hat{P}_{pj}^l(k) = \hat{P}_{\Delta j}^l(k) - K_{pj}^l(k) \frac{\partial h_p^l(\hat{u}_{\Delta j}^l(k))}{\partial u^l(k)} \hat{P}_{\Delta j}^l(k), \quad (34)$$

де  $\hat{u}_{\Delta j}^l(k), \hat{P}_{\Delta j}^l(k)$  – математичне очікування і кореляційна матриця умовної апостеріорної щільності ймовірності  $W_j(u(k))$ , уточнені за вимірюваннями  $\Delta^l(k), l = \overline{1, S}$ ;  $\hat{u}_{pj}^l(k), \hat{P}_{pj}^l(k)$  – математичне очікування і кореляційна матриця умовної апостеріорної щільності ймовірності  $W_j(u(k))$ , уточнені за вимірюваннями  $p^l(k), l = \overline{1, S}$ .

Аналіз ефективності розроблених квазіоптимальних алгоритмів адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань в третьому розділі виконані на площині за допомогою статистичного моделювання.

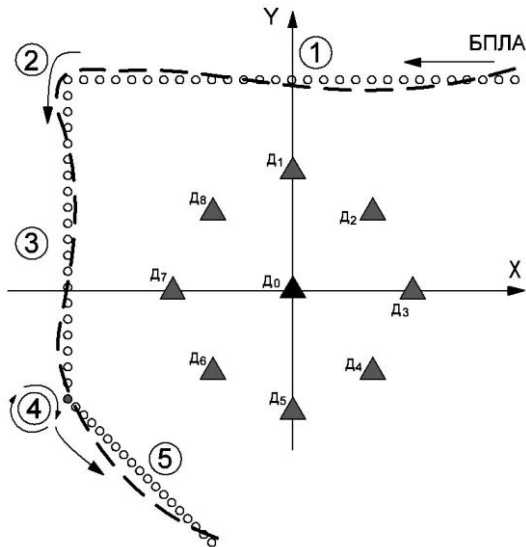


Рис. 3. Конфігурація сенсорної мережі з 9 датчиків і траєкторія руху БПЛА.

Конфігурація сенсорної мережі і тестова траєкторія руху БПЛА показана на рис. 3. СКВ помилки вимірювань при використанні TDOA- і RSS- вимірювань  $\sigma_{\Delta} = 2.4$  м і  $\sigma_p = 1$  дБ, відповідно. Випробування проводилися по ста реалізаціях. Для опису руху БПЛА використовувалася модель з випадковою структурою (3), яка враховує три основні види руху  $M = 3$ : зависання  $j = 1$ , майже рівномірний рух  $j = 2$ , рух з маневром  $j = 3$ .

На рис. 4 показані отримані методом

Монте-Карло залежність математичного очікування (крива 1) і СКВ (крива 2) помилки оцінки місцеположення БПЛА по координатам  $X$ ,  $Y$ , а також СКВ (крива 3) помилки оцінки, розрахованого адаптивним фільтром при комплексному використанні.

Також на рис. 4 показані залежність СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА по координатам  $X$ ,  $Y$  адаптивних фільтрів при незалежній обробці даних, з використанням TDOA-вимірювань (криві 4) і RSS- вимірювань (криві 5). Комплексне використання даних дозволяє зменшити СКВ помилки визначення місцеположення БПЛА в порівнянні з їх роздільним використанням в 2–5 рази. Застосування адаптивної траєкторної фільтрації на основі TDOA- і RSS- вимірювань дозволяють зменшити СКВ помилки визначення місцеположення БПЛА в порівнянні з рекурентними алгоритмами визначення місцеположення на основі TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі в 2–4 рази.

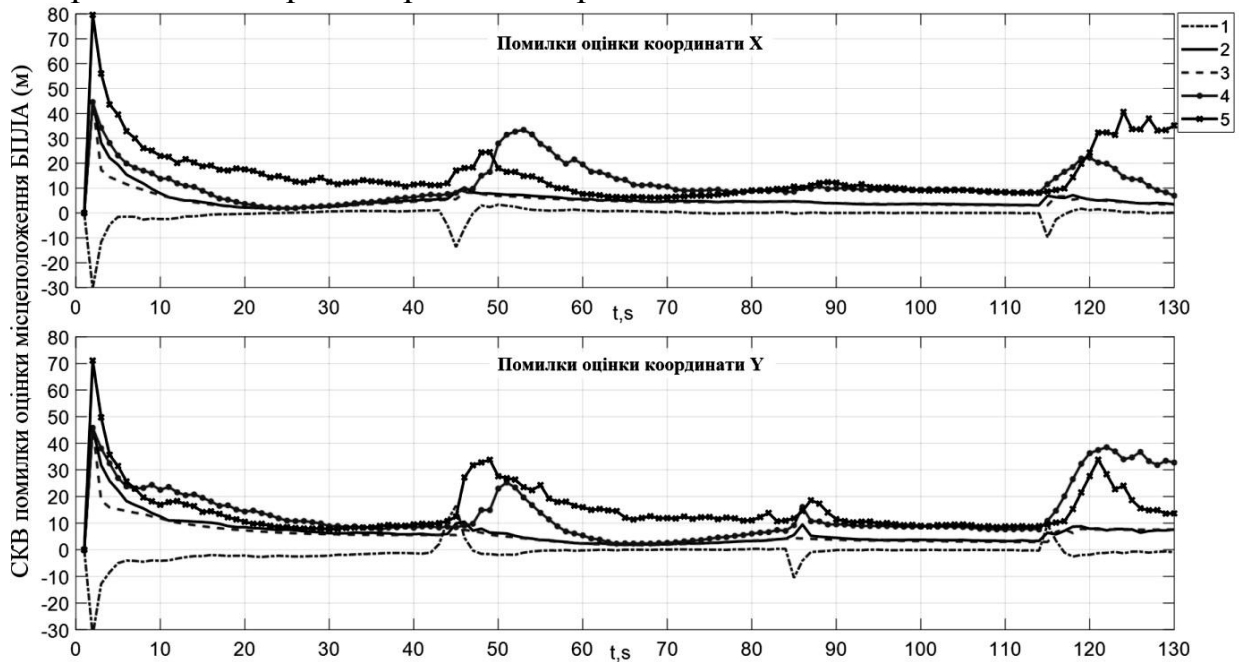


Рис. 4. СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА при використанні адаптивного фільтра.

На рис. 5 показані залежність ймовірностей розпізнавання руху першого (крива 1, неперервна лінія), другого (крива 2, штрихова лінія) і третього (крива 3, штрих-пунктирна лінія) видів, отримані методом Монте-Карло.

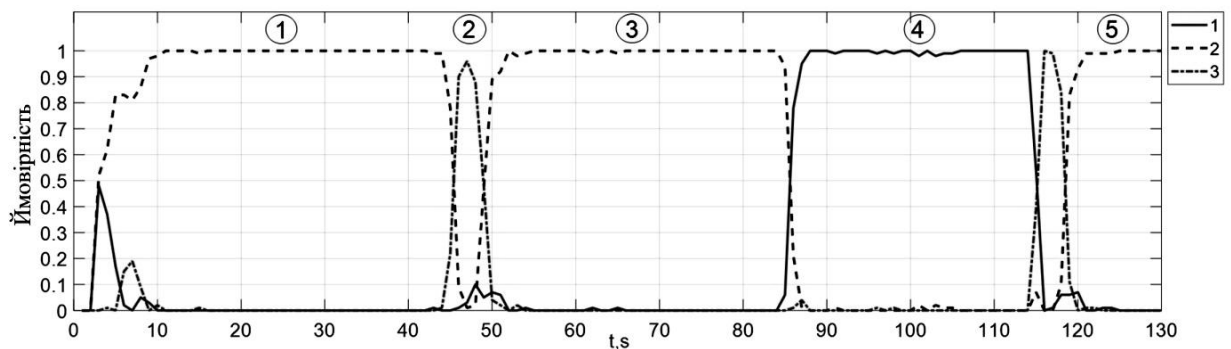


Рис. 5. Ймовірності визначення типу руху при використанні адаптивного фільтра.

Адаптивний фільтр при комплексному використанні TDOA- і RSS-вимірювань дозволяє розпізнати зависання і майже рівномірний рух БПЛА з ймовірністю близькою до одиниці. А також забезпечити більш високу ймовірність розпізнавання маневру, в порівнянні з випадками використання тільки TDOA- або RSS- вимірювань.

У четвертому розділі виконано аналіз ефективності розроблених вище алгоритмів в просторі, що відповідає реальній ситуації оцінювання параметрів руху БПЛА, який випромінює радіосигнал.

Показано, що СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА в горизонтальній площині розробленими рекурентними алгоритмами співрозмірні і близькі до потенційно досяжних. СКВ помилки оцінки висоти БПЛА на основі RSS-вимірювань більше, ніж на основі TDOA-вимірювань в 3 рази, це обумовлено розстановкою датчиків по висоті.

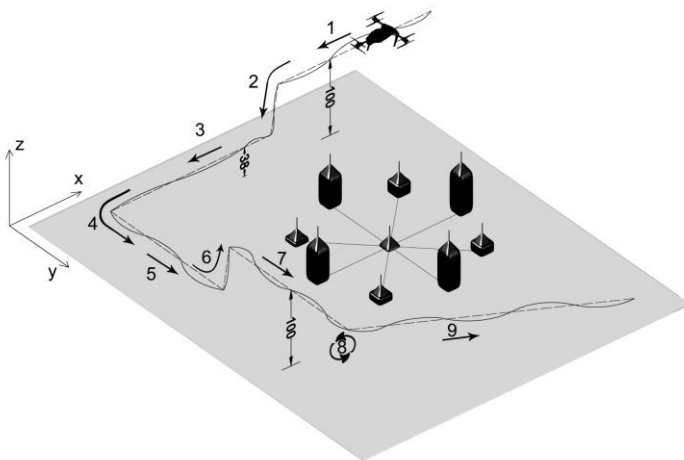


Рис. 6. Конфігурація сенсорної мережі з 9 датчиків і траєкторія руху БПЛА.

Аналіз розроблених алгоритмів адаптивної фільтрації параметрів руху маневруючого БПЛА за даними сенсорної мережі на основі комплексної обробки TDOA- і RSS-вимірювань проведено з використанням точностних характеристик сенсора N6841A з помилками вимірювань  $\sigma_{\Delta} = 7.5\text{ м}$  і  $\sigma_p = 3\text{ дБ}$ .

Конфігурація сенсорної мережі показана на рис. 6. На рис. 7

показані отримані методом Монте-Карло залежність математичного очікування (крива 1) і СКВ (крива 2) помилки оцінки місцеположення БПЛА по координатам  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , а також СКВ (крива 3) помилки оцінки, розрахованого адаптивним фільтром. СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА знаходяться в діапазоні 7–20 м. При цьому точностні характеристики по висоті при комплексній обробці близькі з точностними характеристиками адаптивного алгоритму на основі TDOA-вимірювань.

Для реалізації квазіоптимальних алгоритмів адаптивної фільтрації параметрів руху маневруючого БПЛА за даними сенсорної мережі на основі TDOA-, RSS- вимірювань і комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань може бути використаний сигнальний процесор DSP TMS320C6747 виробництва компанії Texas Instruments з тактовою частотою 456 МГц та часом виконання однієї інструкції 2.2 нс.

Для алгоритму адаптивної фільтрації параметрів руху маневруючого БПЛА на основі TDOA-вимірювань сенсорної мережі необхідно 1.22 мс, на основі RSS-вимірювань сенсорної мережі – 1.22 мс, на основі комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань – 1.83 мс і вони можуть бути реалізовані в реальному масштабі часу.

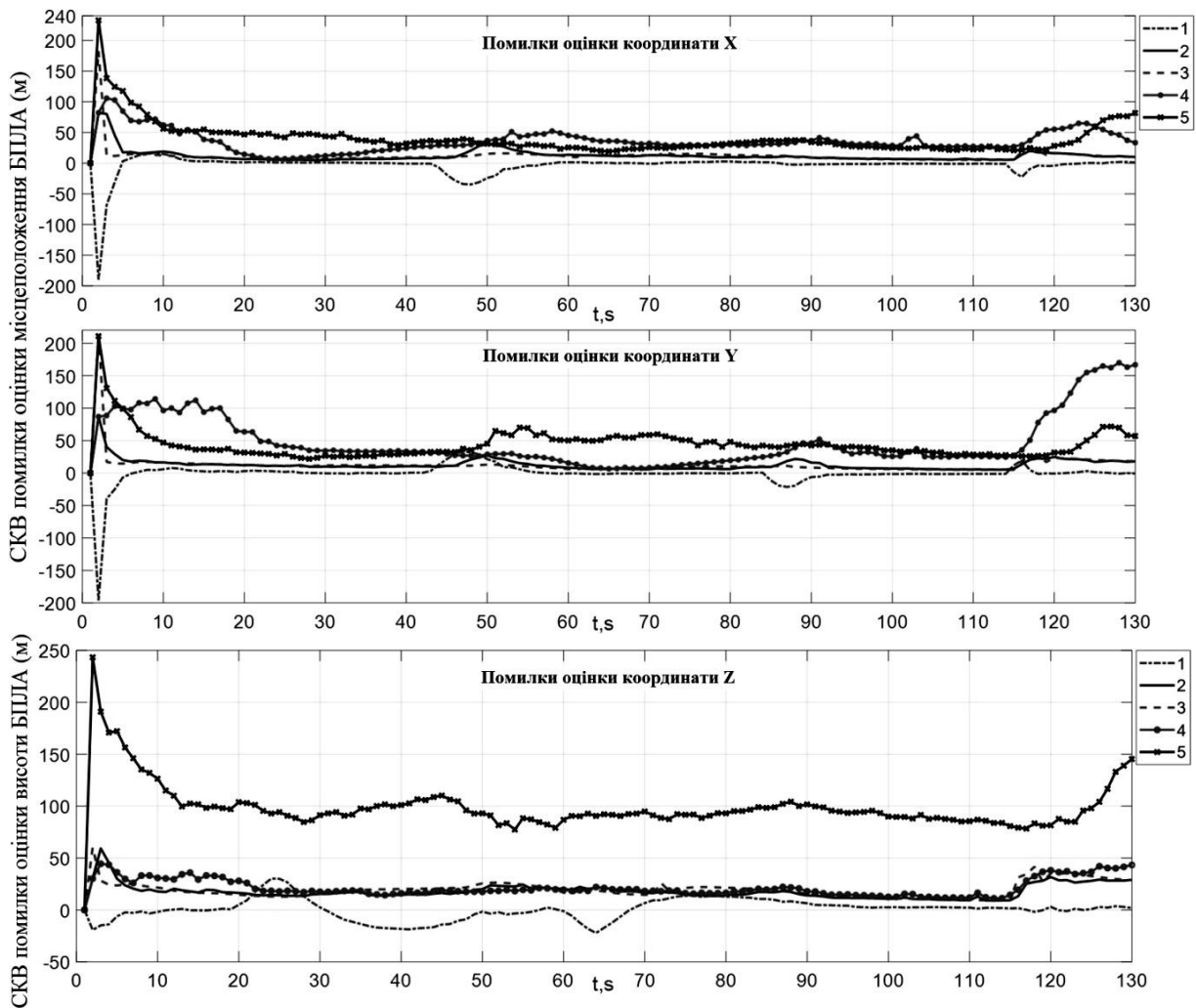


Рис. 7. СКВ помилки оцінки місцеположення і висоти БПЛА при використанні адаптивного фільтра

## ВИСНОВКИ

У дисертації вирішена наукова задача, яка полягає в розробці методів адаптивного оцінювання параметрів руху БПЛА на основі TDOA- і RSS-вимірювань сенсорної мережі і при комплексному використанні, в яких виконується розпізнавання різних видів його руху.

Основні наукові і практичні результати роботи полягають в наступному:

1. Синтезовані на основі математичного апарату змішаних марківських процесів в дискретному часі оптимальні алгоритми адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі TDOA-вимірювань, RSS-вимірювань, а також комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань є рекурентними і описують еволюцію спільних апостеріорних розподілів параметрів руху БПЛА і дискретного компонента, що описує тип його руху. Оптимальні пристрої є багатоканальними і відносяться до класу пристроїв із зворотними зв'язками між каналами.

2. В отриманому з використанням полігаусовської апроксимації апостеріорних розподілів квазіоптимальному алгоритмі адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі TDOA-вимірювань виконується оцінювання помилки вимірювання опорного



датчика, що дозволяє реалізувати послідовну обробку даних, а квазіоптимальний пристрій відноситься до класу багатоканальних пристроїв із зворотними зв'язками між каналами.

3. В отриманому з використанням полігаусовської апроксимації апостеріорних розподілів квазіоптимальному алгоритмі адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі RSS-вимірювань також виконується оцінювання невідомої потужності, а квазіоптимальний пристрій відноситься до класу багатоканальних пристроїв із зворотними зв'язками між каналами.

4. В отриманому з використанням полігаусовської апроксимації апостеріорних розподілів квазіоптимальному алгоритмі адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА при комплексній обробці TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі з невідомою потужністю передавача реалізована послідовна процедура обробки вимірювань, що надходять і він дозволяє підвищити точність визначення його місцеположення в порівнянні з їх роздільною обробкою.

5. Розроблені рекурентні алгоритми визначення місцеположення БПЛА на основі TDOA-, RSS-, а також комплексної обробки TDOA- і RSS-вимірювань сенсорної мережі є нелінійними і відноситься до класу квазіоптимальних алгоритмів з гаусівською апроксимацією апостеріорної щільності ймовірності. Після формування початкових умов на основі відповідних вимірювань від мінімально необхідного числа датчиків, вони дозволяють рекурентно уточнювати місцеположення БПЛА при надходженні вимірювань від інших датчиків.

6. Конфігурація з дев'яти датчиків, вісім з яких розташовані рівномірно по колу, забезпечують вид ізоліній, що обмежують область в яких кругове СКВ не перевищує задане значення, також у вигляді кіл в горизонтальній площині. При подальшому збільшенні числа датчиків, істотного приросту в точності визначення місцеположення БПЛА не відбувається і вона може бути рекомендована, якщо напрямок появи цілі невідомий.

7. Для розглянутої кругової конфігурації сенсорної мережі розроблені рекурентні алгоритми визначення місцеположення БПЛА в горизонтальній площині на основі TDOA-, RSS-, а також комплексної обробки TDOA- і RSS-вимірювань сенсорної мережі дозволяють отримати характеристики в горизонтальній площині близькі до потенційно досяжних, визначених нижньою границею Рао-Крамера. При цьому помилки оцінки висоти алгоритмом на основі RSS-вимірювань на порядок більше, ніж при використанні алгоритму на основі TDOA-вимірювань.

8. Розроблені квазіоптимальні алгоритми адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань дозволяють зменшити СКВ помилки визначення місцеположення в горизонтальній площині в порівнянні з рекурентними алгоритмами визначення місцеположення в 2–4 рази, а застосування комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі, дозволяє зменшити СКВ цієї

помилки додатково в 2–5 рази. При цьому СКВ помилки оцінки потужність передавача БПЛА в сталому режимі складає 0.3 дБ.

9. Адаптивні фільтри на основі TDOA- і RSS- вимірювань дозволяють розпізнати зависання і майже рівномірний рух БПЛА з ймовірністю близькою до одиниці. Адаптивний фільтр на основі комплексної обробки TDOA- і RSS-вимірювань дозволяє підвищити ймовірність розпізнавання короткочасних маневрів БПЛА на 15–40%.

10. При використанні точностних характеристик високочастотного сенсора N6841A розроблений алгоритм адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА за даними сенсорної мережі на основі комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань забезпечує прийнятні точностні характеристики, а алгоритм калманівської фільтрації, що використовує оцінки місцеположення БПЛА на основі методу найменших квадратів, є непрацездатним.

11. На сучасному процесорі DSP TMS320C6747 для реалізації алгоритмів адаптивної фільтрації параметрів руху маневруючого БПЛА на основі TDOA- вимірювань сенсорної мережі необхідно 1.22 мс, на основі RSS- вимірювань сенсорної мережі – 1.22 мс, на основі комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань – 1.83 мс і вони можуть бути реалізовані в реальному масштабі часу.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

**Список публікацій здобувача, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації**

1. Товкач И. О. Рекуррентный алгоритм пассивной локации в сенсорной сети на основе измерения мощности принимаемого сигнала / И.О. Товкач, С.Я. Жук // Вестник НТУУ «КПИ». Серия Радиотехника. Радиоаппаратостроение. – 2016. – № 66. – с. 46-55. (**WEB OF SCIENCE**).

2. Товкач И. О. Адаптивная фильтрация параметров движения БПЛА по данным сенсорной сети на основе измерения мощности принимаемого сигнала / И.О. Товкач, С.Я. Жук // Вестник НТУУ «КПИ». Серия Радиотехника. Радиоаппаратостроение. – 2017. – № 69. – с. 41-48. (**WEB OF SCIENCE**).

3. I.O. Tovkach, S.Ya. Zhuk (2017). Recurrent Algorithm for TDOA Localization in Sensor Networks, J. Aersp. Technol. Manag., São José dos Campos, Vol.9, №4, pp.489-494, Oct.-Dec., 2017. <http://dx.doi.org/10.5028/jatm.v9i4.727> (**SCOPUS**).

4. I.O. Tovkach, S.Ya. Zhuk (2017). Adaptive filtration of radio source movement parameters with complex use of sensor network data based on TDOA and RSS methods, Radioelectronics and Communications Systems. Volume 60, Issue 12, 1 December 2017, Pages 528-537. (**SCOPUS**).

5. I. Tovkach, S. Zhuk (2017). Filtration of parameters of the UAV movement at complex use of data sensor networks, obtained based on the TDOA and RSS

methods, Information and Telecommunication Sciences. 2017, №1, pp.31-36.  
<https://doi.org/10.20535/2411-2976.12017.31-36>

### **Список публікацій здобувача, які свідчать про апробацію матеріалів дисертації**

6. Товкач І.О. Аналіз алгоритмів оцінювання місцезнаходження об'єкту за даними сенсорної мережі на основі різницево-далекомірного методу / І.О.Товкач, С.Я.Жук // Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». Київ, 14 — 20 березня 2016 р.: матеріали конференції — Київ, 2016. — С. 50 — 52.

7. Товкач И.О. Рекуррентный алгоритм пассивной локации в сенсорной сети по разностно-дальномерному методу при некоррелированных ошибках измерений / И.О. Товкач, С.Я. Жук // X Міжнародна Науково-технічна Конференція "Проблеми телекомунікацій 2016", 19.04-22.04.2016 р.: тези доп. — Київ, 2016. — С.432-434.

8. Товкач І.О. Алгоритми пасивної локації за даними сенсорної мережі на основі різницево-далекомірного методу при корельованих похибках вимірювань / І.О.Товкач, С.Я.Жук // X науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Радіoeлектроніка в ХХІ столітті». Київ, 12 — 13 травня 2016 р.: матеріали конференції — Київ, 2016.

9. Товкач И.О. Анализ точностных характеристик алгоритма калмановской фильтрации параметров движения БПЛА по данным сенсорной сети на основе метода RSS /И.О.Товкач, С.Я.Жук // Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». Київ, 20 — 26 березня 2017 р.: матеріали конференції — Київ, 2017. — С. 47 — 49.

10. Tovkach I.O., Zhuk S.Ya., Tkachuk P.S. Methods of determining the location of the radio sources in sensor networks based on WLAN, The International Emergency Management Society, Special Edition, ISSUE 5 – April 2017, pp. 43-46.

11. Tovkach I.O., Zhuk S.Ya. Adaptive filtration of parameters of movement of the maneuvering UAV according to sensor networks, The International Emergency Management Society, Special Edition, ISSUE 5 – April 2017, pp. 47-50.

12. Tovkach I.O., Zhuk S.Ya. Adaptive filtration of parameters of the unmanned aerial vehicle movement on data from its location calculated on the basis the time difference of arrival method, 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), pp. 160-165. (SCOPUS).

13. Товкач И.О. Фильтрация параметров движения БПЛА при комплексном использовании данных сенсорной сети, полученных на основе методов TDOA и RSS /И.О.Товкач, С.Я.Жук // XI Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми телекомунікацій" ПТ-2017: Збірник матеріалів конференції. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. — С. 374 — 376.

14. I.O. Tovkach, O. S. Neuimin, S.Ya. Zhuk (2018). Filtration of parameters of the UAV movement based on the RSS-measurement at the unknown power of

the transmitter, Proceedings of 14 th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, February 20 – 24, 2018, pp. 57-60. (SCOPUS).

15. Товкач І.О. Анализ влияния конфигурации сенсорной сети на точность определения местоположения источника радиоизлучения на основе TDOA-измерений / І.О.Товкач, С.Я.Жук // Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». Київ, 19 — 25 березня 2018 р.: матеріали конференції — Київ, 2018. — С. 38 — 40.

16. Товкач І.О. Анализ влияния конфигурации сенсорной сети на точность определения местоположения источника радиоизлучения при комплексном использовании TDOA- и RSS- измерений /І.О.Товкач, С.Я.Жук // XII Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми телекомунікацій" ПТ-2018: Збірник матеріалів конференції. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. — С.323 — 325.

### АНОТАЦІЇ

**Товкач І.О. Методи адаптивного оцінювання параметрів руху безпілотного літального апарату на основі вимірювань сенсорної мережі.** - Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертаційна робота на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 - Радіотехнічні та телевізійні системи - Київ, 2018.

З використанням математичного апарату розширеного фільтра Калмана розроблені рекурентні алгоритми визначення місцеположення БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі, а також при їх комплексній обробці. Розроблені алгоритми дозволяють отримати характеристики визначення місцеположення БПЛА близькі до потенційно досяжних, що визначаються нижньою границею Рао-Крамера і не потребують обернення матриць великих розмірностей. На основі математичного апарату змішаних марківських процесів в дискретному часі синтезовано оптимальний і квазіоптимальний адаптивні алгоритми фільтрації параметрів руху БПЛА з різними видами маневру на основі TDOA- і RSS- вимірювань і при їх комплексній обробці. У квазіоптимальних адаптивних алгоритмах обробка вимірювань, що надходять від датчиків сенсорної мережі, виконується за допомогою послідовної процедури виконання обчислень. Виконано оцінку ефективності отриманих алгоритмів за допомогою статистичного моделювання на ЕОМ, а також аналіз можливостей їх реалізації на базі сучасних обчислювальних систем.

**Ключові слова:** безпілотний літальний апарат, TDOA-вимірювання, RSS-вимірювання, сенсорна мережа, розширений фільтр Калмана, рекурентний адаптивний алгоритм, змішаний марківський процес.

**Товкач І.О. Методи адаптивного оценивания параметров движения беспилотного летательного аппарата на основе измерений сенсорной сети.** - Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертационная работа на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17 – Радиотехнические и телевизионные системы – Киев, 2018.

С использованием математического аппарата расширенного фильтра Калмана разработаны рекуррентные алгоритмы определения местоположения БПЛА на основе TDOA- и RSS- измерения сенсорной сети, а также при их комплексной обработке. Разработанные алгоритмы позволяют получить характеристики определения местоположения БПЛА близкие к потенциально достижимым, определяемым нижней границей Рао-Крамера и не требуют обращения матриц больших размерностей. На основе математического аппарата смешанных марковских процессов в дискретном времени синтезированы оптимальный и квазиоптимальный адаптивные алгоритмы фильтрации параметров движения БПЛА с различными видами маневра на основе TDOA- и RSS- измерений и при их комплексной обработке. В квазиоптимальных адаптивных алгоритмах обработка измерений, поступающих от датчиков сенсорной сети, выполняется с помощью последовательной процедуры выполнения вычислений. Выполнены оценка эффективности полученных алгоритмов с помощью статистического моделирования на ЭВМ, а также анализ возможностей их реализации на базе современных вычислительных систем.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, TDOA-измерения, RSS-измерения, сенсорная сеть, расширенный фильтр Калмана, рекуррентный адаптивный алгоритм, смешанный марковский процесс.

**Tovkach I.O. Methods of adaptive estimation of unmanned aerial vehicles movement parameters based on measurement of the sensor network.** — Qualification manuscript.

The dissertation for the scientific degree of candidate of engineering sciences in the speciality 05.12.17 – Radio engineering and television systems – Kyiv, 2018.

An actual scientific problem of developing methods for adaptive estimation of the maneuvering UAV movement parameters based on TDOA- and RSS- measurements of the sensor network and their complex use that allow to increase the accuracy of determination its location has been solved in the dissertation. The relevance of the task of determining of the UAV movement parameters based on the sensor network data, due to the emergence of a new class of threats using UAV, which leads to the need to develop systems that solve the problems of detection, location and UAV movement parameters. The analysis of methods for locating UAVs based on TDOA- and RSS- measurements of the sensor network based on mathematical methods of maximum likelihood and least squares is carried out. It is noted that in known methods of calculating the UAV coordinates is performed after arrival of measurements from all sensors. The methods of Kalman filtering and adaptive estimation of object motion parameters are considered and conclusion that it is expedient to use the mathematical apparatus of

mixed Markov processes in discrete time to solve the formulated scientific problem. The research problem was formulated.

With use of a mathematical apparatus of the extended Kalman filtering, recurrent algorithms for determining the UAV location based on TDOA- and RSS-measurements of the sensor network and also in case of their complex processing were developed. The developed algorithms allow to obtain UAV location characteristics close to the potentially achievable ones determined by lower bound Cramer-Rao and do not require the inversion of large-dimensional matrixes.

On the basis of a mathematical apparatus of the mixed Markov processes in discrete time optimal and quasioptimal algorithms of the adaptive filtering of the maneuvering UAV movement parameters according to a sensor network data are synthesized on a basis of: TDOA-measurements; RSS-measurements; complex processing of TDOA- and RSS- measurements.

On the basis of a mathematical apparatus of the mixed Markov processes in discrete time optimal and quasioptimal adaptive algorithms of filtering of the UAV movement parameters with different types of maneuver based on TDOA- and RSS-measurements and in case of their complex processing are synthesized. The devices realizing them, are multi-channel and belongs to the class of devices with feedbacks between channels. In quasioptimal adaptive algorithms, the processing of measurements arriving from sensors of the sensor network is performed using a sequential procedure for execution calculations. In doing so, they provide the polygous approximation of the a posteriori probability density of the estimated vector of the radio source motion parameters.

The efficiency of the obtained algorithms by means of statistical modeling on a computer on the plane and in three-dimensional space is analyzed. The developed adaptive filters based on TDOA- and RSS- measurements allow to reduce RMS errors UAV position in the horizontal plane in comparison with recurrent location algorithms by 2 to 4 times, and the use of complex processing of TDOA- and RSS-measurements of the sensor network, allows to reduce RMS of this error by an additional 2 to 5 times. Adaptive filters based on TDOA- and RSS- measurements allow to recognize the hovering and almost uniform motion of the UAV with the probability close to unit. Adaptive filter based on complex processing of TDOA- and RSS- measurements allows to increase the probability of recognition of short-term UAV maneuvers by 15 – 40%. The configuration of nine sensors, eight of which are located uniformly on a circle, provides a view of the isolines of the circular RMS in the horizontal plane also in the form of circles and can be recommended if the direction of the UAV appearance is unknown. In addition, a comparative analysis of the computational costs required for the implementation of developed algorithms, and also possibilities of their implementation on the basis of modern computer systems is carried out.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle, TDOA-measurement, RSS-measurement, sensor network, an extended Kalman filter, recurrent adaptive algorithm, mixed Markov processes.